

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : **2000-348658**

(43)Date of publication of application : **15.12.2000**

(51)Int.Cl.

H01J 37/147
G01B 15/00
H01J 37/12
H01J 37/141
H01J 37/145
H01J 37/28

(21)Application number : **2000-115454**

(71)Applicant : **APPLIED MATERIALS INC**

(22)Date of filing : **17.04.2000**

(72)Inventor : **ADAMEC PAVEL**

(30)Priority

Priority number : 99 293482

Priority date : **15.04.1999**

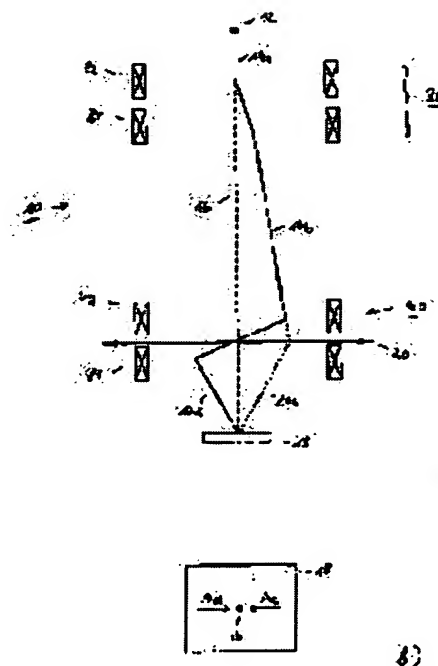
Priority country : US

(54) COLUMN FOR CHARGED PARTICLE BEAM DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To inspect a column for a charged particle beam device in a state of a large arrival angle of the beam while maintaining high resolution.

SOLUTION: A charged particle beam column includes a particle supply source 12, an objective 20, and a front lens deflecting unit 30. It also includes an in-lens deflecting unit 40 disposed in the vicinity of the objective to direct a charged particle beam to an optical axis and deflect the charged particle beam apart from the optical axis in the direction of a passage for it to hit a specimen surface from a first direction. The charged particle beam is again directed to the optical axis by the objective and the in-lens deflecting unit 40 to again direct deflected charged particle beam to a passage for it to hit the specimen surface from a second direction practically opposite to the first direction in a state of a large arrival angle of the beam.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2000-348658
(P2000-348658A)

(43) 公開日 平成12年12月15日 (2000. 12. 15)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テマコード [*] (参考)
H 0 1 J	37/147	H 0 1 J 37/147	B
G 0 1 B	15/00	G 0 1 B 15/00	B
H 0 1 J	37/12	H 0 1 J 37/12	
	37/141	37/141	Z
	37/145	37/145	

審査請求 未請求 請求項の数21 O L 外国語出願 (全 38 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2000-115454(P2000-115454)

(22) 出願日 平成12年4月17日 (2000. 4. 17)

(31) 優先権主張番号 09/293482

(32) 優先日 平成11年4月15日 (1999. 4. 15)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 390040660

アプライド マテリアルズ インコーポレ
イテッド
APPLIED MATERIALS, I
NCORPORATED
アメリカ合衆国 カリフォルニア州
95054 サンタ クララ パウアーズ ア
ベニュー 3050

(72) 発明者 バヴェル アダメック

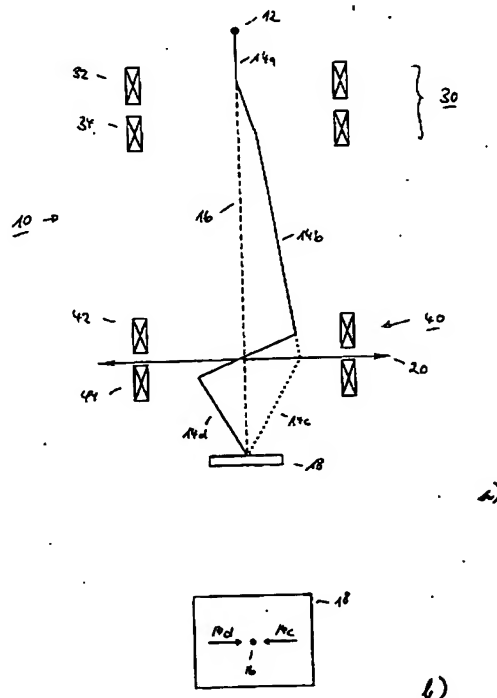
ドイツ国, ハール 85540, ヤクトフ
エルトリンク 73

(74) 代理人 100088155

弁理士 長谷川 芳樹 (外2名)

(54) 【発明の名称】 荷電粒子ビーム装置用カラム

(57) 【要約】

【課題】 高分解能を維持しつつビームの到達角度が大
きい状態で検査可能な荷電粒子ビームカラムを提供す
る。【解決手段】 荷電粒子ビームカラムは、粒子供給源 1
2 と、対物レンズ 20 と、対物レンズと前方レンズ偏向
ユニット 30 を含み、これによって荷電粒子ビームを光
軸の方向に向けて、第 1 の方向から試料表面に当たるよ
うな経路に、光軸から離れて荷電粒子ビームを偏向し、
対物レンズの近傍に配置されたインレンズ偏向ユニット
40 を含み、対物レンズとインレンズ偏向ユニットによ
って荷電粒子ビームを光軸の方向に再度向けて、第 1 の
方向と実質的に反対方向の第 2 の方向からビーム到達角
度が大きい状態で試料表面に当たるような経路に、変更
された荷電粒子ビームを再度方向付けする。

【特許請求の範囲】

【請求項1】 光軸に沿って伝播する荷電粒子ビームを供給するための粒子供給源と、

荷電粒子ビームを試料表面に集束させるための対物レンズと、

粒子供給源と対物レンズ間に配置された前方レンズ偏向ユニットであって、

前記対物レンズと該前方レンズ偏向ユニットとを組み合わせた作用によって、荷電粒子ビームが光軸方向に向けられて第1の方向から試料表面に当たるような経路で光軸から離れるように荷電粒子ビームを偏向させるように適合された前方レンズ偏向ユニットと、

インレンズ偏向ユニットのフィールドと対物レンズのフィールドが重なるように前記対物レンズの近傍に配置されたインレンズ偏向ユニットであって、

前記対物レンズと該インレンズ偏向ユニットとを組み合わせた作用によって、電粒子ビームが光軸方向に再度向けられて、前記第1の方向とは実質的に反対方向の第2の方向から大きな傾斜ビーム到達角度で試料表面に当たるような経路で、偏向された荷電粒子ビームを再方向付けするように適合されたインレンズ偏向ユニットとを備える、傾斜ビーム到達角度で荷電粒子ビームを試料表面に向けるためのカラム。

【請求項2】 前方レンズ偏向ユニットと前記インレンズ偏向ユニットは、 25° より小さいビーム到達角度、好ましくは $3^{\circ} \sim 15^{\circ}$ の到達角度、更に好ましくは $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ の到達角度を提供するように適合されている請求項1記載のカラム。

【請求項3】 前方レンズ偏向ユニットは、前記粒子供給源の見掛けの (apparent) 位置又は粒子供給源の中間の像 (intermediate image) と一致する点から出てくるように見える経路に、光軸から離れて荷電粒子ビームを偏向させるように適合されている二つの偏向器とを備える請求項1記載のカラム。

【請求項4】 インレンズ偏向ユニットは、試料表面で光軸と交差するように偏向ビームを再方向付けする二つの偏向器を備える請求項1記載のカラム。

【請求項5】 対物レンズは、複合磁気静電レンズであり、好ましくは複合磁気静電レンズの静電部分は静電減速レンズである請求項1記載のカラム。

【請求項6】 試料と対物レンズの極片との間に電位を印加するための手段を更に備えた請求項5記載のカラム。

【請求項7】 対物レンズは、集束距離が短い下側レンズと、集束距離がより長い上側レンズとを備える二段レンズである請求項1記載のカラム。

【請求項8】 下側レンズの集束距離は、約10mm以下であり、好ましくは約2mm～約5mmである請求項7記載のカラム。

【請求項9】 上側レンズの集束距離は、約40mm以

下であり、好ましくは約10mm～約20mmである請求項7記載のカラム。

【請求項10】 インレンズ偏向ユニットは、上側レンズの下方で下側レンズに近い方に配置される請求項7記載のカラム。

【請求項11】 試料の下方に配置される強磁気レンズを更に備える請求項1記載のカラム。

【請求項12】 試料表面全体に荷電粒子ビームを走査するための手段を更に備える請求項1記載のカラム。

【請求項13】 (a) 光軸に沿って伝播する荷電粒子ビームを供給するステップと、

(b) 試料表面に荷電粒子ビームを集束させるステップとを備える、大きなビーム到達角度で荷電粒子ビームを試料表面に向けるための方法であって、更に、

(c) ビーム到達角度を選択するステップと、

(d) 光軸に沿って伝播する荷電粒子ビームを光軸から離れて偏向させるステップであって、ビームを偏向させ集束させる作用を組み合わせることによって荷電粒子ビームが方向付けられ、第1の方向から試料表面に当たるように偏向の大きさが選択され、前記偏向が試料表面の収差に第1の寄与をもたらす偏向ステップと、

(e) 偏向された荷電粒子ビームを再度方向付けるステップであって、

偏向されたビームを再方向付けし集束させる作用を組み合わせることによって荷電粒子が方向付けられ、前記第1の方向と実質的に反対の方向である第2の方向から前記大きなビーム到達角度で試料表面に当たるように再方向付けが選択され、

前記再方向付けが試料表面の収差に第2の寄与をもたらす再方向付けステップとを備えることを特徴とし、

ステップ(d)の偏向とステップ(e)の再方向付けは試料表面の全収差が最小になるように選択される方法。

【請求項14】 荷電粒子供給源と、

対物レンズと、

該荷電粒子供給源と該対物レンズの間に配置された前方レンズ偏向ユニットと、

該対物レンズに近接したインレンズ偏向ユニットとを備える、定められた (defined) 光軸を有する荷電粒子カラムであって、

前記前方レンズ偏向器は光軸から離れて荷電粒子を偏向させるように動作可能であり、前記インレンズ偏向器は荷電粒子を光軸に向けて偏向させるように動作可能である定められた光軸を有する荷電粒子カラム。

【請求項15】 前方レンズ偏向器は、前記粒子供給源又は粒子供給源の中間の像から現れる経路に荷電粒子を光軸から離れて偏向させるように動作可能である二つの偏向器を備え、前記インレンズ偏向器は、被検査試料の表面の光軸と交差するように偏向されたビームを再方向付けするように動作可能である二つの偏向器を備える請

求項14記載の荷電粒子カラム。

【請求項16】 前記対物レンズは、界浸レンズ、結合磁気静電レンズ、短集束距離及び長集束距離を有する二段レンズ、及びそれらの組み合わせからなる群から選択されたレンズである請求項14記載のカラム。

【請求項17】 前記荷電粒子ビームを被検査試料の表面上で走査するための手段を更に備える請求項14記載のカラム。

【請求項18】 光軸に沿って伝播する荷電粒子ビームを供給する荷電粒子供給源と、集束フィールドを作る対物レンズと、粒子供給源と対物レンズ間に配置され、励起されたとき、第1の方向に光軸から離れて荷電粒子ビームを偏向させる前方レンズ偏向ユニットと、インレンズ偏向器ユニットとを備えた、試料上に傾斜ビーム到達角度を供給可能な荷電粒子カラムであって、励起されたとき、前記インレンズ偏向ユニットは、集束フィールドと少なくとも部分的に重複する位置に偏向フィールドを作り、集束フィールド内の変曲点で粒子ビームを偏向させるカラム。

【請求項19】 変曲点は、光軸と集束フィールドの集束面との交点付近にある請求項18記載の荷電粒子カラム。

【請求項20】 前記偏向フィールドは前記集束フィールドと共に、第1の方向とは反対の方向にビームを偏向し、ビームが光軸と交差した後、光軸と試料が交差する位置で実質的に試料に当たるようにビームを再方向付ける請求項18記載の荷電粒子カラム。

【請求項21】 光軸に沿って伝播する荷電粒子ビームを供給するステップと、荷電粒子ビームを集束させるための集束フィールドを供給するステップと、光軸から離れた荷電粒子ビームに、集束フィールド上に印加される第1の偏向を適用するステップと、集束フィールドと少なくとも部分的に重複する荷電粒子ビームに第2の偏向を適用し、集束フィールドと共に、光軸周辺でビームを屈折させ傾斜角でビームを試料表面に到達させるステップとを備える、荷電粒子ビームを傾斜角で試料表面に到達させる方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【技術分野】 本発明は、試料を検査するための荷電粒子ビーム装置に関する。更に詳細に言えば、本発明は、ある到達角度で試料表面上にビームが到達するビームカラムに関するものである。

【0002】

【背景技術】 走査形電子顕微鏡（SEM）等の荷電粒子ビーム装置では、荷電粒子ビームの典型的な開口角度及び典型的な到達角度は数ミリラジアン程度のものである。多くの応用では、荷電粒子ビームは、90°～180°

ミリラジアンに対応する約5°～10°とかなり大きな角度でサンプル表面上に到達する。

【0003】 このような到達角度を必要とする応用は、試料表面を立体的に視覚化する場合である。SEMを用いた立体写真技術は、走査形電子顕微鏡の開発初期の時代まで遡る。実質的に比較的粗いサンプルの全ての部分から電子が収集されるので、SEMの像はかなり「実際の」外観を有するものとなる。このような実際の外観を得られる主な理由は、ビーム衝突点で発生した二次電子信号が、分散照射された巨視的対象物の表面の知覚的輝度と同じように表面の局所的な傾斜で変化するためである。更に、この信号が検出器からの弱い電界により収集される効率性が変化することにより、位置関数として信号が修正され、あたかもサンプル表面が影を含むように見える。このように像は従来の白黒写真の視覚的手掛かり（curs）を持っているが、これらの手掛かりは多くの場合当てにならないものである。従って、確実な視覚情報を提供する方法を得ることが必須となる。立体的な視覚化は、そのような方法である。他のコード化メカニズムでは不明瞭な結果を生じる状態のものを検出し解析することは、有益であり、かつ時には不可欠なものである。

【0004】 別の応用では、試料表面に関する地形的な情報が、例えば傾斜ビームで得た対の立体像の視差から抽出される。更なる応用である試料の三次元結像でも、例えば米国特許第5,734,164号公報に開示されているように、数度だけビームを傾斜させることを必要とする。

【0005】 これら全ての応用では、ビームを傾斜させるメカニズムが重要な役割を果たす。初期の解決策としては、試料を機械的に傾けて二つの透視像を得て、立体効果を達成していた。しかしながら、機械的な不完全性により、試料が横方向に移動することは避けられず、対の立体像の要素間に位置合わせ誤差を生じてしまうことがよくある。これは、集積回路のメモリセルアレイ等のように非常に規則的な構造物に関しては特に問題となるものである。

【0006】 ビームの傾斜を電氣的に実行する場合、横軸の位置合わせに関する限り、試料が水平方向に維持されているということが非常に重要な利点となる。更に、電氣的に傾斜させる作業は機械的に傾斜させるよりもかなり高速に処理できる。しかしながら、電氣的方法にも欠点がある。ある方法において、ビームは、各光線が電子源（図2を参照）の見掛けの位置と一致する点から現れるように、対物レンズの上方で偏向される（前方レンズ偏向）。このようにして、サンプル表面が集束状態にある限り、各光線はサンプルの同じ領域に集束される。しかしながら、その結果として、ビームはレンズ収差により付随して生じた劣化でかなり軸から外れて対物レンズのフィールドを横切ることになる。特に、色収

差で得られる分解能は数10ナノメートルまでに制限される。多くの応用では、約5nmよりも高い分解能が要求される。

【0007】別の方法として、偏向コイルが対物レンズの下方に配置されれば（後方レンズ偏向）、ビームは光軸上でレンズを通過する（図3）。しかしながら、最終レンズの下方にある偏向コイルの物理的寸法により、獲得可能な最小作業距離、即ち最終レンズと被検査試料との間の獲得可能な最小距離が制限される。従って、作業距離が広くなり器具の分解能が劣化することにより、許容可能な程度の分解能を得ることができない。

【0008】

【発明の概要】本発明は、上述した従来例の欠点や不利益を解消することを目的とする。特に、本発明は、試料が、荷電粒子像の高分解能を維持しながらビームの到達角度が大きい状態で検査可能である改良形の荷電粒子ビームカラムを提供することを目的としている。この目的を達成するために、本発明の一つの態様によれば、独立の請求項1及び14に記載されたカラム及び請求項13に記載された方法が提供される。

【0009】本発明の更なる好適な特徴、態様及び詳細は、従属の請求項、明細書の記載及び添付の図面から明らかになる。本発明の請求項は、本発明を一般的な用語で規定するための第1の非制限的アプローチとして理解されることを意図したものである。

【0010】一つの態様によれば、本発明は、大きなビーム到達角度で荷電粒子ビームを試料表面に向けるためのカラムを提供し、このカラムは、光軸に沿って伝播する荷電粒子ビームを供給するための粒子供給源と、荷電粒子ビームを試料表面に集束させるための対物レンズと、粒子供給源と対物レンズとの間に配置された前方レンズ偏向ユニットであり、対物レンズと前方レンズ偏向ユニットを組み合わせることによって荷電粒子ビームを光軸の方向に向けて、第1の方向から試料表面に当たるような経路に、光軸から離れて荷電粒子ビームを偏向するための前方レンズ偏向ユニットと、インレンズ偏向ユニットと対物レンズのフィールドが重なるように対物レンズの近傍に配置されたインレンズ偏向ユニットであって、対物レンズとインレンズ偏向ユニットを組み合わせることによって荷電粒子ビームを光軸の方向に向け直して、第1の方向と実質的に反対方向の第2の方向からビーム到達角度が大きな状態で試料表面に当たるような経路に、荷電粒子ビームを再度方向付けするためのインレンズ偏向ユニットとを備える。

【0011】前方レンズ偏向ユニットと対物レンズのフィールドは実質的に重ならないものが好ましい。更に、インレンズ偏向ユニットと対物レンズが明らかに重なっていれば利点となる。

【0012】上述したように、前方レンズ偏向は、対物レンズを通るビーム経路を軸から外して、大きな色収差

を生じさせる原因となる。これらの色収差は、偏向器のフィールドと対物レンズのフィールドとが重なり合わない限り、偏向システムの位置とは無関係であることが分かっている。偏向システムがレンズのフィールド内に配置される場合、色収差は減少する。偏向システムがレンズのフィールド内深くに配置されるか、若しくは一部分でもレンズの下方にあれば、50%以上色収差を減少させることが可能である。しかしながら、それでもこのようなインレンズ偏向システムの色収差は、およそ数10ナノメートルのものであるため、多くの応用では適用できないものである。

【0013】驚くべきことに、本発明により、前方レンズ偏向で生じた色収差が反対方向のインレンズ偏向で補正可能であることが分かった。前方レンズ偏向とインレンズ偏向を組み合わせることによって、インレンズ偏向を実行しないときにビームがサンプルに当たる方向とは実質的に反対の方向から電荷粒子ビームがサンプル表面に当たることになる。

【0014】特定の理論に限定せずに考えると、この効果は今のところ以下のように理解されている。例えば、前方レンズ偏向システムを単独で用いると、ビーム到達角度が5°の場合色収差は100nmとなり、インレンズ偏向システムを単独で用いると、ビーム到達角度が5°の場合色収差は50nmとなり、即ち50%減少することになる。前方レンズ偏向システムにビームを5°だけ傾斜させ、インレンズ偏向システムにビームを10°だけ反対方向に傾斜させると、最終的な傾斜角度は5°になる。

【0015】反対方向でも、色収差は両方の場合とも100nmとなるため、これらの色収差はちょうど互いを補正し合うことになる。ごく僅かな色収差で最終的なビーム到達角度5°が結果として得られる。当然ながら、インレンズシステムの別の減少要因として、他の相対斜角を選択して補正を行う必要があることは当業者に認識されるであろう。更に、本発明の実行は、偏向システムの色収差の知識に左右されるものではない。予め選択されたビーム到達角度で最小収差を得る前方レンズ偏向システムとインレンズ偏向システムの偏向角度は、結果として得られた像から実験的に抽出されるものである。

【0016】従って、本発明は、サンプル表面上での大きなビーム到達角度が、色収差が大きいことから生じる分解能を通常のように低減せずに得られるという利点を有する。

【0017】好適な実施形態では、前方レンズ偏向ユニットとインレンズ偏向ユニットは、25°よりも小さなビーム到達角度であり、好ましくは3°～15°の到達角度であり、更に好ましくは5°～10°である到達角度を供給するものである。上記に挙げた例では、3°のビーム到達角度を得るには、前方レンズ偏向システムを励起して3°だけビームを偏向させ、更にインレンズ偏

向システムを励起して反対方向に 6° だけビームを偏向させることによって、最終的な傾斜角 3° を得る。

【0018】更なる好適な実施形態では、前方レンズ偏向ユニットは、粒子供給源の見掛けの位置と一致する点から現れるように見える経路か、若しくは適用できる場合は、粒子供給源の中間の像の見掛けの位置と一致する点から現れるように見える経路に、光軸から離れて荷電粒子ビームを偏向するための二つの偏向器を備える。

【0019】更なる好適な実施形態では、インレンズ偏向ユニットは、試料表面で光軸と交差するように偏向ビームを再方向付けする二つの偏向器を備える。

【0020】本発明の好適な態様において、これまで記載した偏向システムは種々の対物レンズで使用可能であるが、対物レンズは複合磁気静電レンズである。好ましくは、複合磁気静電レンズの静電部分は、静電減速レンズである。このような複合磁気静電レンズを用いることによって、SEMの場合、数100電子ボルト等のように、低加速エネルギーで高分解能が得られる。このような低加速エネルギーは特に現在の半導体産業においては望ましいものであり、放射感度性の試料を帯電させたり損傷を与えないように、又はそのどちらかを与えないようにする。好適な実施形態では、静電減速レンズは荷電粒子として電子ビームエネルギーを、5 keVより低く、好ましくは2 keVより低く、更に好ましくは約1 keV以下まで下げる。

【0021】好適な実施形態では、カラムは、試料と対物レンズの極片間に電位差を印加するための手段を備える。従って、静電減速レンズは、試料と対物レンズの極片間に設けられ、更なる電極が必要なくなる。しかしながら、このように発生した減速フィールドを補充及び／又は修正するために更なる電極が存在する場合もあることは当業者により認識されるであろう。

【0022】十分な傾斜角を得るには、インレンズ偏向ユニットの偏向フィールドの強度が、集束距離がより短い対物レンズに対してより大きいものでなければならない。インレンズ偏向ユニットに対してこのように要求することによって、標準結像モード、即ちビームを傾斜させずにカラムが動作するモードで対物レンズの達成可能な分解能を制限する強い対物レンズを使用しなくてもよい場合がある。

【0023】この制限を解消するために、本発明の更なる好適な態様によれば、対物レンズは、集束距離が短い下側レンズと、集束距離がより長い上側レンズとからなる二段レンズである。ビームを傾斜させずに高分解能を得る必要があれば、下側レンズのみが使用される。下側レンズの集束距離は短いため、高分解能が達成される。大きいビーム到達角度に関しては、上側のより弱いレンズのみが用いられ、僅かに低い分解能となり大きなビーム到達角度を得る。当業者に認識されているように、分解能とビーム到達角度の必要な組み合わせに応じて、相

対的な励起強度で両方のレンズが同時に使用される場合もある。

【0024】好ましくは、下側レンズの集束距離は約10 mm以下であり、更に好ましくは下側レンズの集束距離は約2 mm～約5 mmの範囲のものである。上側レンズの集束距離は約40 mm以下であり、更に好ましくは上側レンズの集束距離は約10 mm～約20 mmの範囲のものである。多くの場合、上側レンズの集束距離は3 mmより長いものである。

【0025】更なる好適な実施形態では、インレンズ偏向ユニットは、上側レンズの下方にあり、下側レンズに近い方に配置される。

【0026】試料上方に両段を配置した二段レンズを用いずに、試料の下方に更に強磁性のレンズを配置することも利点となる場合がある。ビームを傾斜させないモードでは、高分解能が得られる。当業者に認識されているように、この場合においても、分解能とビーム到達角度の必要な組み合わせに応じて相対励起強度で両レンズを同時に使用することもある。また、更なる強磁性レンズを二段レンズと組み合わせて用いる場合もある。

【0027】好ましくは、カラムは試料表面上で荷電粒子ビームを走査するための手段を更に備える。

【0028】本発明は、(a) 光軸に沿って伝播する荷電粒子ビームを供給するステップと、(b) 試料表面に荷電粒子ビームを集束させるステップとを備える、大きなビーム到達角度で荷電粒子ビームを試料表面に向けるための方法であって、この方法は更に、(c) ビーム到達角度を選択するステップと、(d) 光軸に沿って伝播する荷電粒子ビームを光軸から離れて偏向させるステップであって、ビームを偏向させ集束させる作用を組み合わせることによって荷電粒子ビームが方向付けられ、第1の方向から試料表面に当たるように偏向の大きさが選択され、前記偏向が試料表面の収差に第1の寄与をもたらす偏向ステップと、(e) 偏向された荷電粒子ビームを再度方向付けるステップであって、偏向されたビームを再方向付けして集束させる作用を組み合わせることによって荷電粒子を向けて、前記第1の方向と実質的に反対の方向である第2の方向から大きなビーム到達角度で試料表面に当たるように再方向付けが選択され、前記再方向付けが試料表面の収差に第2の寄与をもたらす再方向付けステップとを備えることを特徴とし、ステップ(d)の偏向とステップ(e)の再方向付けは試料表面の全収差が最小になるように選択されることを特徴とする。

【0029】偏向及び再方向付けはビーム到達角度を一定に保ちながら変更可能である。このようにして、収差に対する第1及び第2の寄与は、ビームの到達角度を変えずに変更することが可能である。従って、本発明の実施形態による方法では、偏向と再方向付けが調整されて、一定の到達角度でサンプル表面上の(全)収差を最

小にする。上述した理論の枠内において、これは、偏向及び再方向付けが収差に対する第1及び第2の寄与が本質的に互いに補正し合うような場合である。

【0030】更なる態様によれば、本発明は、光軸に沿って伝播する荷電粒子ビームを供給するための粒子供給源と、荷電粒子ビームを試料表面に集束させるための対物レンズと、光軸から荷電粒子ビームを偏向させ、粒子供給源と対物レンズ間に配置されて前方レンズ偏向ユニットと対物レンズのフィールドが実質的に全く重複しない前方レンズ偏向ユニットと、光軸の反対側に偏向された荷電粒子ビームを再方向付けし、対物レンズの近傍に配置されて、インレンズ偏向ユニットと対物レンズの偏向ユニットのフィールドが明らかに重複することによって、対物レンズとインレンズ偏向ユニットを組み合わせた作用により、光軸に戻る方向に荷電粒子ビームを向けて、荷電粒子ビームが大きなビーム到達角度で試料に当たるインレンズ偏向ユニットとを備える、大きな傾斜ビーム到達角度で荷電粒子ビームを試料表面に向けるためのカラムを提供する。

【0031】本発明の別の態様によれば、定められた光軸を有する荷電粒子カラムが提供され、このカラムは、荷電粒子供給源と、対物レンズと、荷電粒子供給源と対物レンズの間に配置された前方レンズ偏向ユニットと、対物レンズに近接し、動作する際に対物レンズの集束フィールドと重複する偏向フィールドを作るインレンズ偏向ユニットとからなる定められた光軸を有する荷電粒子カラムであって、前方レンズ偏向器は光軸から離れて荷電粒子を偏向させるように動作可能であり、インレンズ偏向器は荷電粒子を光軸に向けて偏向させるように動作可能であることを特徴とする。

【0032】本発明の上述した態様や他のより詳細な態様の幾つかは、以下の記載に記述されており、図面を参照して部分的に説明されるであろう。

【0033】図面において、同じ参照番号は同じ要素を指している。

【0034】

【好ましい実施形態の説明】以下には、本発明の好適な実施形態は電子を荷電粒子として用いるものとして記載されている。しかしながら、本発明は、電子の使用に限られたものではなく、陽子、イオンや他の荷電粒子も同様に使用することも含んでいる。

【0035】本発明をより良く理解するために、SEMの従来の設計に関する典型的な問題が、図2及び図3に示されている。一般的に、電子ビームは電子供給源12から放出され、光軸16に沿って対物レンズ20の方向に伝播する。本発明を理解するにはあまり重要ではない電子供給源のアノード、コンデンサレンズ、開口部、走査コイル、検出器等の要素は、図面では省略している。対物レンズ20は、電子ビームを試料18の表面に集束させる。電子ビームと試料18とを相互作用させて、適

切な検出器（図示せず）で収集され検出される二次電子を発生させる。

【0036】図2では、二段の前方レンズ偏向ユニット70が光軸16に沿って経路15aから経路15bにビームを偏向し、これは粒子供給源12の見掛けの位置と一致する点から現れるように見える。このように、偏向されたビームは、サンプル表面が集束状態（光線15d）にある限り、対物レンズ20によりあらゆる偏向に対してサンプルの同じ領域に集束される。偏向により、ビームはかなり軸から外れて対物レンズのフィールドを横切るため、色収差が大きくなる。

【0037】軸上ビームでは、有限エネルギーのビームの広がり、直径 d_c を有する最も混乱がない円形のものとなり、この直径は

$$d_c = C_c \alpha \Delta E / E \quad (1)$$

で表わされる。ここで、 C_c は色収差係数で、 α は通常集中角であり、 $\Delta E / E$ は電子ビームエネルギーの分数変分である。集中角 α の軸上ビームの色収差を示す式

(1)はまた、荷電粒子ビームが軸ずれしてレンズを通過する場所の状況を示すのに用いることも可能である。この場合、等式(1)において集中角 α はビーム到達角度と置き換えなければならず、長さ d_c は細長いビームの断面の横方向の広がりである。典型的な集中角（数10分の1度）と比較してビーム到達角度が非常に大きい（数度）と、色収差が大きくなる。

【0038】この効果を、 $E - \Delta E$ 、 E 、 $E + \Delta E$ のエネルギーをそれぞれが有する電子を表わす光線15e、15d、15cによって図2に略図的に示されている。図2に示されているように、色収差は像をぼやかし、獲得可能分解能を数10ナノメートルに制限する。

【0039】図3は、偏向コイル82、84が対物レンズの下側に配置されて後方レンズ偏向システム80を形成する代替的な従来の設計を示すものである。ビームが対物レンズ20を通過した後、第1の偏向コイル82は光軸から離すようにビームを偏向させ、第2の偏向コイル84はビームを光軸に戻すように方向付けて、所望のビーム到達角度でサンプルに当たるようにする。ビームが光軸16上で対物レンズ20を通過するので、分解能はレンズの軸外れ収差によって劣化することはない。しかしながら、最終的なレンズ20の下側にあるコイルの物理的寸法により、より長い焦点距離を有する対物レンズが必要となるため、獲得できる最小作業距離が制限されてしまう。焦点距離がより長いと色収差や更に球面収差まで大きくなる。従って、図3に示された解決法では、満足のいく像分解能は得ることができない。

【0040】図1(a)は、参照番号10で一般的に示した本発明によるカラムのある特定の実施形態を示す図である。上述したように、電子ビームは電子供給源12から放出され、経路14a上を光軸16に沿って試料18の表面にビームを集束させる対物レンズ20の方へと

伝播する。前方レンズ偏向ユニット 30 は、電子供給源 12 の見掛けの位置と一致する点から現れるように見えるビームを光軸 16 から経路 14 b へと偏向するための二つの偏向コイル 32、34 を備える。カラムの設計によるが、参照番号 12 は、電子供給源そのものか、若しくは電子供給源の中間の像を表すものとされる。

【0041】前方レンズ偏向ユニット 30 は、電子供給源 12（若しくは電子供給源の中間の像）と対物レンズ 20 との間に配置されるため、実際それぞれのフィールドとの間で重なり合う部分が存在しない。更に、前方レンズ偏向ユニット 30 により発生した色収差は、前方レンズ偏向ユニット 30 の位置とは無関係であり、選択されたビーム到達角度にほぼ比例している。図 1 (a) に示す実施形態では、前方レンズ偏向ユニット 30 により発生した色収差は、 5° の傾斜角につき 100 nm であった。インレンズ偏向ユニット 40 を用いずに、前方レンズ偏向ユニット 30 のみが用いられれば、電子ビームは参照番号 14 c で略図的に示す経路をたどり、第 1 の方向から試料の表面に当たる。図 1 (b) に示した表面の平面図では、この第 1 の方向の試料表面への投影が矢印 14 c で示されている。

【0042】それぞれのフィールドが重複するように対物レンズのフィールドの内側に偏向システムが配置されると、色収差が減少する。偏向システムを対物レンズの内側か若しくは僅かに下側に配置することによって、 50% 以上の色収差が減少可能である。図 1 (a) に略図的に示されている実施形態では、更なる偏向システム、即ちインレンズ偏向ユニット 40 が、色収差が 50% 減少されるように配置される。このようにして、インレンズ偏向ユニット 40 の色収差は、 5° の傾斜角につき 50 nm だけとなる。

【0043】インレンズ偏向ユニット 40 は、偏向コイル 42 と 44 からなる二段のユニットである。図 1

(a) の略図は、コイルの一つが対物レンズ 20 の主平面上に位置し、もう一つのコイルがその主平面の下側に位置する場合の配置を示しているが、偏向ユニット 40 と対物レンズ 20 のフィールド間が重なり合う限り、他の配列も可能である。それぞれのフィールド間の重複部分はできるだけ大きい方が好ましい。

【0044】本発明の発明者等は、前方レンズ偏向ユニット 30 の偏向によりビームの経路が軸から外れることにより生じる色収差が、インレンズ偏向ユニット 40 を用いることで補正可能であることを観察した。上述したように、インレンズ偏向ユニット 40 を用いなければ、電子ビームは経路 14 c をたどり、第 1 の方向から試料表面に当たる。ここで、インレンズ偏向ユニット 40 を用いてビームを再方向付けすれば、図 1 (a) の参照番号 14 d で略図的に示された経路をとる。再度方向付けすることによって、第 1 の方向と実質的に反対の方向である第 2 の方向から電子ビームが試料表面に当たること

になる。図 1 (b) は、矢印 14 d で示された、試料表面への第 2 の方向の投影を示す。経路 14 d が対物レンズ 20 の主平面に近い位置にある光軸 16 と交差することが図 1 (a) から分かるが、必ずしもこれは必要な条件ではない。

【0045】インレンズ偏向ユニット 40 が対物レンズ 20 のフィールド内にあるので、予め選択した到達角度で電子ビームがサンプルに当たるように、光軸へ戻すように方向付けることは、インレンズ偏向ユニット 40 だけの作用ではなく、インレンズ偏向ユニット 40 と対物レンズ 20 とを組み合わせた作用によるものである。対物レンズ 20 とインレンズ偏向ユニット 40 のフィールドのかかなりの部分が重なり合うので、これらのビーム曲げへの寄与は、図 1 (a) において図的に別々にできないものである。説明のため、図 1 (a) は、あたかも偏向がインレンズ偏向ユニット 40 によってのみ生じているかのように、単純化した方法でビーム経路を図示している。

【0046】また、図 1 から図 3 に示されているビーム経路は、磁気レンズによって生じるビームの回転を示していないという点で更に単純化したものである。これらの効果は、2次元の図面では図示が困難であるということと、これらの追加の効果は当業者によく知られたものであるということから、図示されていない。また、これらの効果は本発明を理解するには重要なことではない。

【0047】特定の理論に限定せずに考えると、現在、色収差の補正は以下により説明されると考えられる。

【0048】最終的なビーム到達角度が 5° であることが望ましければ、前方レンズ偏向ユニット 30 は、インレンズ偏向ユニット 40 が動作しなければ、第 1 の方向から到達角度 5° で入るようになるレベルまで励起される。次いで、図 1 (a) では、ビームは経路 14 c をたどり、右側から（図 1 (b) にも示されている）入る角度 5° で試料上に到達する。

【0049】次いで、前方レンズ偏向ユニット 30 が動作しなければ、インレンズ偏向ユニット 40 は、第 1 の方向と実質的に反対の方向である第 2 の方向から到達角度 10° で入るようになるレベルまで励磁される。次いで、両偏向ユニット 30、40 は共に経路 14 d になり、第 2 の方向（図 1 (b) にも示されている）から入る所望の到達角度 $10^\circ - 5^\circ = 5^\circ$ となる。上述した色収差の値に関して、導入される色収差は、第 1 の方向に 100 nm （角度 5° で $100\text{ nm}/5^\circ$ ）と、第 2 の反対方向に 100 nm （角度 10° で $50\text{ nm}/5^\circ$ ）である。収差は両方向に等しいため、互いに補正しあう。

【0050】偏向ユニットの色収差が異なる値をもつ場合、同じビーム到達角度を得るために他の傾斜角を選択しなければいけないことは明らかである。例えば、前方レンズ偏向ユニットの収差が $100\text{ nm}/5^\circ$ であり、

インレンズ偏向ユニットの収差が $60\text{ nm}/5^\circ$ であれば、傾斜角はそれぞれ、 7.5° と 12.5° となる。次いで、ビーム到達角度は $12.5^\circ - 7.5^\circ = 5^\circ$ であり、色収差が補正される（一つの方向に $100\text{ nm}/5^\circ \cdot 7.5^\circ = 150\text{ nm}$ であり、それとは反対方向に $60\text{ nm}/5^\circ \cdot 12.5^\circ = 150\text{ nm}$ ）。

【0051】強調すべきことは、本発明の実行は、上述したメカニズムの正確性や知識に依存しないものであることである。特に、上述した前方レンズ偏向ユニットとインレンズ偏向ユニット30、40の収差と、傾斜角を知る必要はない。本発明では、インレンズ偏向ユニット40がビームを再方向付けすることによって、ビームが第1の方向（即ち、インレンズ偏向ユニットを用いなかった場合試料表面にビームが当たる方向）とは実質的に反対の方向から到達し、更にインレンズ偏向ユニット40のフィールドは対物レンズ20のフィールドと重複するが、前方レンズ偏向ユニット30のフィールドとは重複しないという知識で十分である。次いで、インレンズ偏向ユニット40の収差は前方レンズ偏向ユニット30と比較すると減少され、更に予め選択されたあらゆるビーム到達角度では、色収差補正となる傾斜角が存在する。最大の補正で所望の到達角度が達成される特定の励起は、得られる像から実験的に抽出される。

【0052】上述した例から、インレンズ偏向ユニット40は、色収差が前方レンズ偏向ユニット30の色収差により近いものであれば、より大きな角度で偏向しなければならないことは明らかである。従って、インレンズ偏向ユニット40は、対物レンズ20のフィールド内の深い位置に配置されるか、若しくはそれよりも僅かに下方に配置されて、それぞれのフィールドがかなり重複することが好ましい。

【0053】図面では、前方レンズ偏向ユニット30が二つの偏向コイル32、34からなるものとして示しているが、例えば、参照番号12が電子供給源の中間の像を表わすものである場合等、単一の偏向器のみからなる前方レンズ偏向ユニット30を用いることも可能である。次いで、単一の偏向器はほぼ中間の像の高さに配置されることが有利である。この単一偏向器は、光軸16から離れて電子供給源の中間の像から現れるように見える経路にビームを偏向するのには十分なものである。

【0054】本発明の別の実施形態が図4を参照して記載される。この図は、二つの結像モードを可能とする対物レンズ50をより詳細に示した図である。

【0055】集束距離がより短い対物レンズが使用されれば、インレンズ偏向ユニット40の偏向フィールドの強度を高めなければならないことが分かっている。集束距離が非常に短い対物レンズを用いて作業するのが有利な応用もある。これは、大きな偏向フィールドを有するインレンズ偏向ユニットを必要とする。しかしながら、インレンズ偏向ユニットのフィールドの最大強度には制

限があり、対物レンズの集束距離がある一定の値よりも大きく、しばしば所望のものよりも大きくする必要がでてくる。これは、標準結像モード、即ちビームを傾斜させる必要がない場合のモードにおいて、このようなかなり弱い対物レンズの達成可能な分解能は約 5 nm に制限される。

【0056】図4の対物レンズ50は、この問題を二つの結像モードを提供することで解消しており、これらの結像モードは、ビームを傾斜させる必要がない場合の光分解能結像モードと、より低減された分解能を有するビーム傾斜モードである。

【0057】対物レンズ50は、低加速エネルギーで優れた分解能をもつ複合磁気静電レンズである。磁気レンズは、極片52と54で形成される焦点距離が短い下側レンズと、極片54と56で形成される焦点距離がより長い上側レンズとからなる二段レンズである。粒子ビームを減速させるための静電レンズは、電極58と下側磁気レンズの下側極片52によって形成される。

【0058】光分解能が望ましく、更にビームを傾斜させる必要がなければ、下側レンズ52及び54だけが使用される。焦点距離が短いため、約 2 nm の分解能が得られる。この場合、インレンズ偏向コイル40は走査コイル又はシフトコイルとして用いられる。

【0059】また一方で、ビームの到達角度を大きくする必要があれば、上側レンズ54、56が用いられる。偏向ユニット40の偏向フィールドに対する制限はより弱くなり、容易に解消される。このモードでは、分解能が僅かに低くなる（約 4 nm ）ことと引き換えに、大きなビームの到達角度が得られる。もちろん、両レンズを同時に使用して、高い分解能と大きな到達角度との釣り合いを考慮しながら上記両極の間にある結果を得ることもある。

【0060】本発明の特徴を実行する対物レンズの更なる実施形態が図5～図10に示されている。分かるように、記載されているいかなるレンズも、図1(a)に示した対物レンズ20として用いることができる。

【0061】図5では、対物レンズ120は単段の純粋な磁気レンズである。約 2 keV 以下のかかなり低いエネルギーでの分解能を改良するために、磁気レンズを静電レンズ、好ましくは静電減速レンズと組み合わせることもある。

【0062】対物レンズ220と試料18との間に、それらのうちの一つに、通常は試料18に電位を印加することによって、静電減速フィールドができる。図6の実施形態では、負の電位Uが試料に印加され、また対物レンズ220の極片252は接地されている。例えば、 $2 \sim 20\text{ keV}$ の集束磁気レンズ内にあるビームエネルギーでは、例えば、負の電位Uは $2 \sim 20\text{ kV}$ のもので、この結果、到達エネルギーは $10\text{ eV} \sim 2\text{ keV}$ のものとなる。このように到達エネルギーが低いと、レンズの集束特

性や像の分解能が向上する。

【0063】図7には、対物レンズ320に対して更なる実施形態が示されており、試料18に印加された電位U1と、電極326に印加された電位U2は任意のものである。電極324、326と、それに対応する電位U2とU3があり、サンプル上方で電子ビームを減速させる減速フィールドを発生させる静電レンズを形成する場合もある。電位U3は、例えば2〜20kVのもので、更に電位U2は、例えば0〜5kVのものである。また別に、追加の電位U1が試料に印加されれば、電位は−5kV〜5kV間で変化する。

【0064】電極326と電位U2は必要とされないが、もしあれば試料表面でのフィールドの制御性が向上する。

【0065】図8は、静電三電極(422、424、426)対物レンズ420と共に前方レンズ偏向システム及びインレンズ偏向システムを用いた図である。インレンズ偏向ユニット40は二つの偏向器42、44とを備え、各偏向器は対物レンズ420の電極のうちの二つの電極(422、424及び424、426)の間に配置される。代替実施形態では、電極422、424、426が複数区分に分割され、インレンズ偏向ユニットがレンズ区分の部分集合によって形成される。

【0066】図9は、図7に示す対物レンズ520を有するカラムを示しているが、強磁気レンズ90を試料18の下方に配置して、ビームを傾斜しないで動作モードで高分解能を達成する。もちろん、図4に関して記載したように、強磁気レンズ90はまた、ビームを傾斜させたモードで動作され、高い分解能と大きなビーム到達角度との間の兼ね合い状態を得る。

【0067】図10は、二段磁気レンズと静電レンズとを組み合わせた対物レンズ620を有し、図4の構造に

類似した構造を示している。2keV以下の低エネルギーで改良された分解能を生じる電極624、626により静電減速レンズが形成される。磁気レンズは極片652と654により形成される下側レンズと、極片654、656で形成される上側レンズを有する二段レンズである。この実施形態では、下側レンズの焦点距離は、例えば4mmであるが、上側レンズの焦点距離は、例えば15mmである。このカラムは図4に関して上述したように動作する。

【図面の簡単な説明】

【図1】(a)は、本発明の実施形態によるビームカラムの略図的垂直断面図であり、(b)は、(a)のビームカラムの試料に対する略図的平面図である。

【図2】前方レンズ偏向システムを用いた従来のビームカラムの略図的垂直断面図である。

【図3】後方レンズ偏向システムを用いた従来のビームカラムの略図的垂直断面図である。

【図4】本発明の実施形態による二段対物レンズの拡大図である。

【図5】本発明の更なる好適な実施形態によるビームカラムの下部を示す垂直断面図である。

【図6】本発明の更なる好適な実施形態によるビームカラムの下部を示す垂直断面図である。

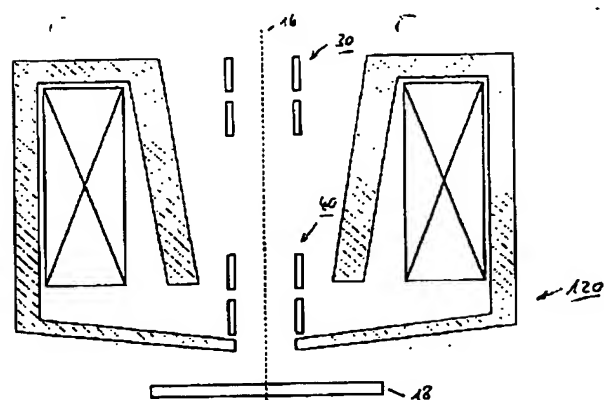
【図7】本発明の更なる好適な実施形態によるビームカラムの下部を示す垂直断面図である。

【図8】本発明の更なる好適な実施形態によるビームカラムの下部を示す垂直断面図である。

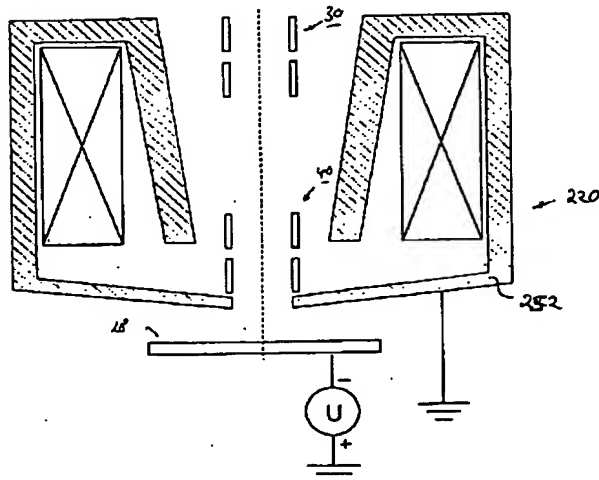
【図9】本発明の更なる好適な実施形態によるビームカラムの下部を示す垂直断面図である。

【図10】本発明の更なる好適な実施形態によるビームカラムの下部を示す垂直断面図である。

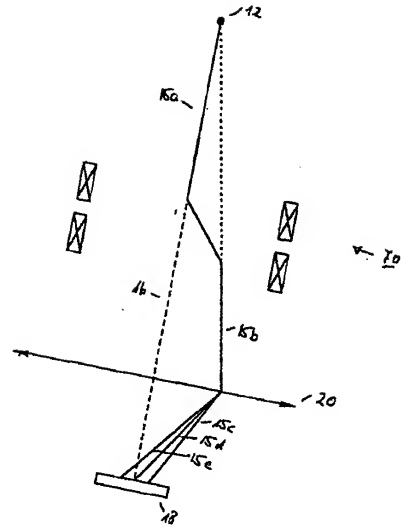
【図5】



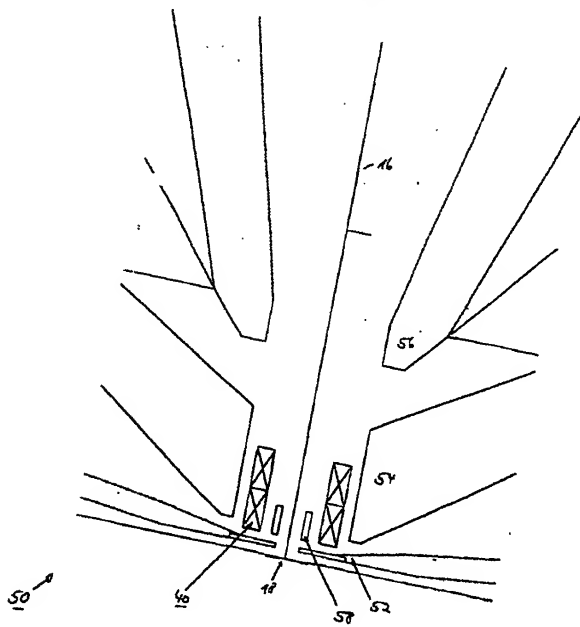
【図6】



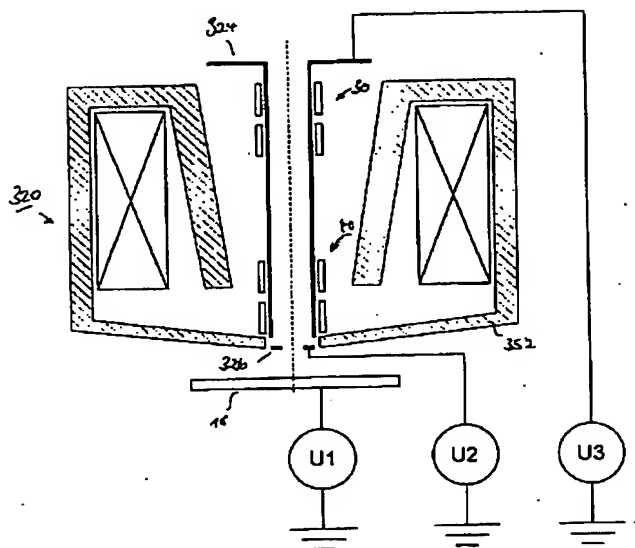
【图2】



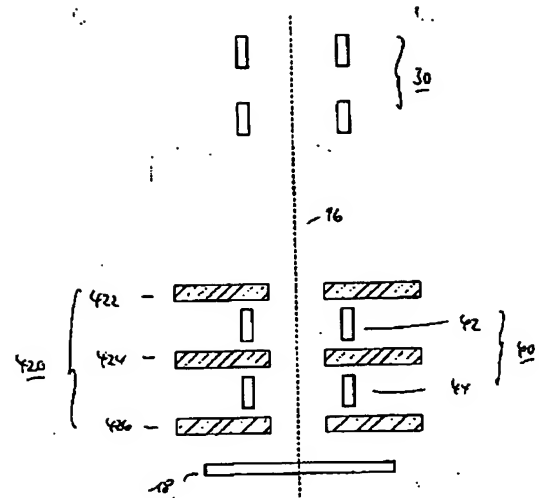
【圖4】



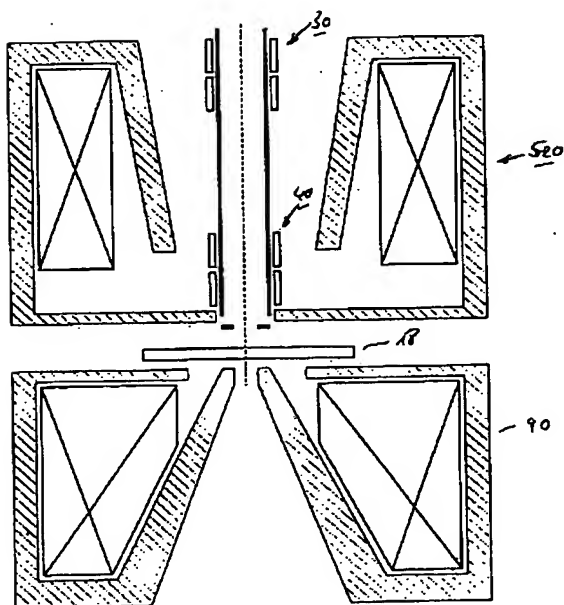
【図7】



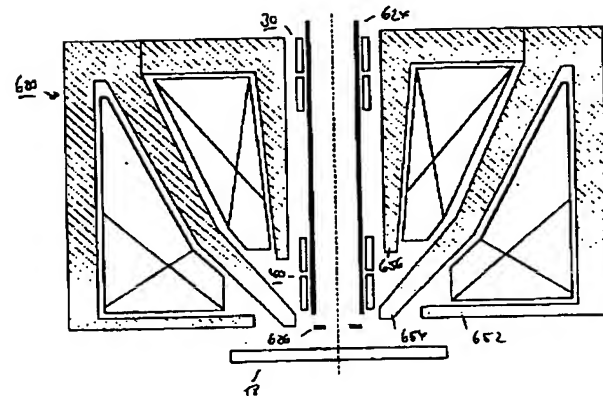
【図8】



【図9】



【図10】



フロントページの続き

(51) Int. Cl.⁷
H 0 1 J 37/28

識別記号

F I
H 0 1 J 37/28

テーマコード (参考)
B

【外国語明細書】

1 Title of Invention

**COLUMN FOR CHARGED PARTICLE BEAM
DEVICE**

2 Claims

1. A column for directing a beam of charged particles onto a specimen surface under an oblique beam landing angle, the column comprising:
a particle source for providing the beam of charged particles propagating along an optical axis;
an objective lens for focussing the beam of charged particles onto the specimen surface;
a pre-lens deflection unit arranged between the particle source and the objective lens;
the pre-lens deflection unit being adapted to deflect the beam of charged particles away from the optical axis on such a path that the combined action of the objective lens and the pre-lens deflection unit directs the beam of charged particles towards the optical axis to hit the specimen surface from a first direction;
an in-lens deflection unit arranged in the vicinity of the objective lens such that the fields of the in-lens deflection unit and the objective lens overlap;
the in-lens deflection unit being adapted to redirect the deflected beam of charged particles on such a path that the combined action of the objective lens and the in-lens deflection unit redirects the beam of charged particles towards the optical axis to hit the specimen surface under said oblique beam landing angle from a second direction substantially opposite to said first direction.
2. The column according to claim 1, wherein the pre-lens deflection unit and the in-lens deflection unit are adapted to provide a beam landing angle less than 25° , preferably between 3° and 15° , more preferable between 5° and 10° .
3. The column according to claim 1, wherein the pre-lens deflection unit comprises two deflectors adapted to deflect the beam of charged particles away from the optical axis to a path seeming to emerge from a point coincident with the apparent position of the particle source or with an intermediate image of the particle source

4. The column according to claim 1, wherein the in-lens deflection unit comprises two deflectors adapted to redirect the deflected beam to cross the optical axis at the specimen surface .
5. The column according to claim 1, wherein the objective lens is a compound magnetic-electrostatic lens, preferably where the electrostatic part of the compound magnetic-electrostatic lens is an electrostatic retarding lens.
6. The column according to claim 5, further comprising means for applying a potential difference between the specimen and a pole piece of the objective lens.
7. The column according to claims 1, wherein the objective lens is a two-stage lens, comprising a lower lens with short focal length and an upper lens with larger focal length.
8. The column according to claim 7, wherein the focal length of the lower lens is about or less than 10 mm, preferably between about 2 mm and about 5 mm.
9. The column according to claim 7, wherein the focal length of the upper lens is about or less than 40 mm, preferably between about 10 mm and about 20 mm.
10. The column according to any of claims 7, wherein the in-lens deflection unit is arranged below the upper lens, proximal to the lower lens.
11. The column according to claim 1, further comprising a strong magnetic lens arranged below the specimen.
12. The column according to claim 1, further comprising means for scanning the beam of charged particles over the specimen surface .

13. A method for directing a beam of charged particles onto a specimen surface under a large beam landing angle, the method comprising the steps of:

- a) providing a beam of charged particles propagating along an optical axis;
- b) focussing the beam of charges particles onto the specimen surface;

characterized in that the method further comprises the steps of

- c) selecting a beam landing angle;
- d) deflecting the beam of charged particles propagating along the optical axis away from the optical axis,

whereby the magnitude of the deflection is chosen such that the combined action of deflecting and focussing the beam directs the beam of charged particles to hit the specimen surface from a first direction;

the deflection causing a first contribution to the aberration on the specimen surface;

- e) redirecting the deflected beam of charged particles,

whereby the redirection is chosen such that the combined action of redirecting and focussing the deflected beam directs the beam of charged particles to hit the specimen surface under said large beam landing angle from a second direction substantially opposite to said first direction;

the redirection causing a second contribution to the aberration on the specimen surface;

whereby the deflection in step d) and the redirection in step e) are chosen such that the total aberration on the specimen surface is minimized.

14. A charged particle column having a defined optical axis , the charged particle column comprising:

a charged particle source , an objective lens ,

a pre-lens deflection unit positioned between the source and the objective lens ,

an in-lens deflection unit proximal to the objective lens ,

wherein said pre-lens deflector is operable to deflect charged particles away from the optical axis , and said in-lens deflector is operable to deflect charged particles towards the optical axis .

15. The charged particle column according to claim 14, wherein the pre-lens deflector comprises two deflectors operable to deflect charged particles away from the optical axis to a path emerging from the particle source or an intermediate image thereof, and wherein the in-lens deflector comprises two deflectors operable to redirect the deflected beam to cross the optical axis at the surface of a specimen to be examined.
16. The column according to claim 14, wherein the objective lens is a lens selected from the group consisting of immersion lenses, compound magnetic-electrostatic lenses, two-stage lenses with a short and a large focal length, and combinations thereof.
17. The column according to any of claims 14, further comprising means for scanning the beam of charged particles over the surface of a specimen to be examined.
18. A charged particle column capable of providing oblique beam landing angles on a specimen, comprising:
 - a charged particle source providing a beam of charged particles propagating along an optical axis;
 - an objective lens creating a focusing field;
 - a pre-lens deflection unit positioned between the particle source and the objective lens and, when energized, deflecting the beam of charged particles away from the optical axis in a first direction;
 - an in-lens deflector unit;wherein, when energized, said in-lens deflection unit creates a deflection field at least partially overlapping the focusing field, and deflecting the particle beam at an inflection point within the focusing field.

19. The charged particle column of claim 18, wherein the inflection point is about the intersection of the optical axis and focusing plane of the focusing field.
20. The charged particle column of claim 18, wherein the deflection field together with the focusing field deflect the beam in a direction opposite the first direction and, after the beam has crossed the optical axis, redirect the beam so as to hit the specimen substantially at an intersection of the optical axis and the specimen.
21. A method for causing a charged particle beam to land on a specimen's surface at an oblique angle, comprising:
 - providing a charged particle beam propagating along an optical axis;
 - providing a focusing field for focusing the charged particle beam;
 - applying a first deflection upon the charged particle beam away from the optical axis, the first deflection being applied above the focusing field;
 - applying a second deflection upon the charged particle beam at least partially overlapping the focusing field and, together with the focusing field causing the beam to inflect about the optical axis and land upon the specimen's surface at an oblique angle.

3 Detailed Description of Invention

FIELD OF THE INVENTION

This invention relates to a charged particle beam device for the examination of specimen. In particular, this invention relates to a beam column where the beam may land on the specimen surface under an oblique landing angle.

BACKGROUND OF THE INVENTION

In charged particle beam devices, such as a scanning electron microscope (SEM) the typical aperture angle as well as the typical landing angle of the charged particle beam is of the order of several millirads. For many applications it is desirable that the charged particle beam lands on the sample surface under a much larger angle of about 5° to 10° , corresponding to 90 to 180 millirads.

One application which requires such landing angles is the stereoscopic visualization of a specimen surface. Stereographic techniques using a SEM date back to the early developmental period of scanning electron microscopy. Since electrons can be collected from practically all parts of a relatively rough sample, a SEM image has a rather "real" appearance. The main reason for this real appearance is that the secondary electron signal produced at the point of beam impact varies with the local slope of the surface in the same way as the perceived brightness of the surface of a diffusely illuminated macroscopic object. Furthermore, variations in the efficiency with which this signal is collected by the weak electric field from the detector modifies the signal as a function of position such that it appears as if the sample surface contained shadows. While the images have thus all the visual cues of a conventional black and white photograph, these cues are in many situations deceptive. It is therefore

essential that a method which provides authentic perspective information is available. Stereoscopic visualization is such a method. It is useful and sometimes indispensable for detecting and resolving situations where other coding mechanisms yield ambiguous results.

In another application, topographical information about the specimen surface may be extracted, for example, from the parallax between stereo pairs of images obtained with a tilted beam. A further application, three-dimensional imaging of a specimen, requires also a beam tilted by several degrees, see, e.g., US Patent Number 5,734,164.

In all these applications, the beam tilting mechanism plays a key role. In early solutions, a stereo effect was achieved by mechanically tilting the specimen to provide two perspectives. However, due to mechanical imperfections, a lateral movement of the specimen is inevitable, which often results in misregistrations between the elements of a stereo image pair. This problem is especially pertinent for highly regular structures such as an array of memory cells in an integrated circuit.

When beam tilting is carried out electrically, the fact that the specimen can remain horizontally is a significant advantage as far as the lateral coordinate registration is concerned. Electrical tilting is also much faster than its mechanical counterpart. The electrical method, however, has also certain drawbacks. In one method, the beam is deflected above the objective lens (pre-lens deflection) in such a way that each ray seems to emerge from a point coincident with the apparent position of the electron source (see Fig. 2). This way, each ray is focussed on the same area of the sample as long as the sample surface is in focus. However, as a consequence, the beam traverses the field of the objective lens considerably off-axis with its attendant degradations due to lens aberrations. Especially chromatic aberrations limit the attainable resolution to several tens of nanometers. Many applications require a much higher resolution of about 5 nm.

If, as in another method, the deflection coils are arranged below the objective lens (post-lens deflection), the beam passes through the lens on the optical axis (Fig. 3). However, the physical dimensions of the coils below the final lens imposes a limit on the minimum attainable working distance, i.e., on the minimum attainable distance between the final lens and the specimen to be examined. An acceptable resolution is then not achieved due to the degraded instrument resolution arising from the enlarged working distance.

SUMMARY OF THE INVENTION

The present invention intends to overcome the above-mentioned drawbacks and disadvantages of the prior art. Specifically, the invention intends to provide an improved charged particle beam column allowing specimen to be examined with a large beam landing angle while maintaining a high resolution of the charged particle image. According to one aspect of the present invention, to achieve this, there is provided a column as specified in independent claims 1 and 14 and a method as specified in claim 13.

Further advantageous features, aspects and details of the invention are evident from the dependent claims, the description and the accompanying drawings. The claims are intended to be understood as a first non-limiting approach to define the invention in general terms.

According to one aspect, the invention provides a column for directing a beam of charged particles onto a specimen surface under a large beam landing angle, the column comprising:

a particle source for providing the beam of charged particles propagating along an optical axis; an objective lens for focussing the beam of charged particles onto the specimen surface; a pre-lens deflection unit arranged between the particle source and the objective lens; the pre-lens deflection unit being adapted to deflect the beam of charged particles away from the optical axis on such a path that the combined action of the objective lens and the pre-lens deflection unit directs the beam of charged particles towards the optical axis to hit the specimen surface from a first direction; an in-lens deflection unit arranged in the vicinity of the objective lens such that the fields of the in-lens deflection unit and the objective lens overlap; the in-lens deflection unit being adapted to redirect the deflected beam of charged particles on such a path that the combined action of the objective lens and the in-lens deflection unit redirects the beam of charged particles towards the optical axis to hit the specimen surface under said large beam landing angle from a second direction substantially opposite to said first direction.

Preferably, the fields of the pre-lens deflection unit and the objective lens have substantially no overlap. It is further advantageous if the in-lens deflection unit and the objective lens have appreciable overlap.

As discussed above, pre-lens deflection leads to an off-axis path of the beam through the objective lens which gives rise to large chromatic aberrations. These chromatic aberrations have been found to be independent of the position of the deflecting system as long as the field of the deflector and the field of the objective lens do not overlap. When the deflection system is placed inside the field of the lens, the chromatic aberrations are reduced. The reduction can amount to 50% or more, if the deflection system is placed deep inside the field of the lens or even partly below the lens. However, the chromatic aberration of such an in-lens deflection system is still in the order of tens of nanometers and thus not acceptable for many applications.

It has surprisingly been found by the present inventors that the chromatic aberrations caused by pre-lens deflection can be compensated by an in-lens deflection in the opposite direction. The combined action of pre-lens deflection and in-lens deflection causes the charged particle beam to hit the sample surface from a direction substantially opposite to the direction from which the beam hits the sample when no in-lens deflection is carried out.

Without being bound to a particular theory, this effect is presently understood as follows: For example, the pre-lens deflection system alone may cause a chromatic aberration of 100 nm for a beam landing angle of 5° , and the in-lens deflection system alone may cause a chromatic aberration of 50 nm for a beam landing angle of 5° , i.e. one which is reduced by 50%. Exciting the pre-lens deflection system to tilt the beam by 5° , and the in-lens deflection system to tilt the beam by 10° in the opposite direction then leads to a net tilt angle of 5° .

The chromatic aberrations amount to 100 nm in both cases, albeit in opposite directions, such that these chromatic aberrations exactly compensate each other. A net beam landing angle of 5° at negligible chromatic aberrations results. Of course, the skilled person will appreciate that for different reduction factors of the in-lens system, other relative tilt angles may have to be chosen to achieve compensation. Further, the practice of the invention does not depend on a knowledge of the chromatic aberrations of the deflection systems. The deflection angles of the pre-lens and in-lens deflection system at which for a preselected beam landing angle minimum aberration is obtained may be extracted experimentally from the resulting images.

The invention has thus the advantage that large beam landing angles on the sample surface can be provided without the usual reduction in resolutions arising from large chromatic aberrations.

In a preferred embodiment, the pre-lens deflection unit and the in-lens deflection unit are adapted to provide a beam landing angle less than 25° , preferably between 3° and 15° , more preferable between 5° and 10° . In the example given above, a beam landing angle of 3° would be realized by exciting the pre-lens deflection system to tilt the beam by 3° , and the in-lens deflection system to tilt the beam by 6° in the opposite direction to achieve a net tilt angle of 3° .

In a further preferred embodiment, the pre-lens deflection unit comprises two deflectors adapted to deflect the beam of charged particle away from the optical axis to a path seeming to emerge from a point coincident with the apparent position of the particle source or, if applicable, to emerge from a point coincident with the apparent position of an intermediate image of the particle source.

In still a further preferred embodiment, the in-lens deflection unit comprises two deflectors adapted to redirect the deflected beam to cross the optical axis at the specimen surface.

Although the deflection system described so far can be used with any kind of objective lens, in a preferred aspect of the invention, the objective lens is a compound magnetic-electrostatic lens. Preferably, the electrostatic part of the compound magnetic-electrostatic lens is an electrostatic retarding lens. Using such a compound magnetic-electrostatic lens yields superior resolution at low acceleration energies, such as a few hundred electron volts in case of a SEM. Such low acceleration energies are desirable especially in modern semiconductor industry, to avoid charging and/or damaging of radiation sensitive specimens. In a preferred embodiment, the electrostatic retarding lens reduces the energy of a beam of electrons as charged particles to less than 5 keV, more preferably to less than 2 keV, most preferably to about or less than 1 keV.

In a preferred embodiment, the column comprises means for applying a potential difference between the specimen and a pole piece of the objective lens. An electrostatic retarding lens may thus be created between the specimen and a pole piece of the objective

lens, without making additional electrodes necessary. The skilled person will appreciate, however, that additional electrodes may be present to supplement and/or modify the thus generated retarding field.

To obtain a sufficient tilt angle, the strength of the deflecting field of the in-lens deflection unit must be larger for an objective lens with a shorter focal length. In some cases this requirement on the in-lens deflection unit may prevent the use of strong objective lenses thereby limiting the achievable resolution of the objective lens in the standard imaging mode, i.e. in a mode where the column is operated without beam tilt.

To overcome this limitation, according to a further preferred aspect of the invention, the objective lens is a two-stage lens, comprising a lower lens with short focal length and an upper lens with larger focal length. If high resolution but no beam tilt is required, only the lower lens would be used. Due to its short focal length, high resolution is achieved. For large beam landing angles, only the upper, weaker lens would be used, resulting in a slightly worse resolution allowing large beam landing angles. As will be appreciated by the skilled person, both lenses may be used simultaneously with relative excitation strengths depending on the required combination of resolution and beam landing angle.

Preferably, the focal length of the lower lens is about or less than 10 mm, more preferably, the focal length of the lower lens is in the range between about 2 mm and about 5 mm. The focal length of the upper lens is preferably about or less than 40 mm, more preferably the focal length of the upper lens is in the range between about 10 mm and about 20 mm. In most cases the focal length of the upper lens will be larger than 3 mm.

In a further preferred embodiment, the in-lens deflection unit is arranged below the upper lens, proximal to the lower lens.

Instead of a two-stage lens with both stages arranged above the specimen, it may be advantageous to put a further strong magnetic lens below the specimen. In a mode with no beam tilt, high resolution may then be achieved. As will be appreciated by the skilled person, also in this case both lenses may be used simultaneously with relative excitation strengths depending on the required combination of resolution and beam landing angle. Also, the additional strong magnetic lens may be combined with a two-stage lens.

Preferably, the column further comprises means for scanning the beam of charged particles over the surface of the specimen.

The invention further comprises a method for directing a beam of charged particles onto a specimen surface under a large beam landing angle, the method comprising the steps of:

- a) providing a beam of charged particles propagating along an optical axis;
 - b) focussing the beam of charges particles onto the specimen surface;
- whereby the method is characterized in further comprising the steps of
- c) selecting a beam landing angle;
 - d) deflecting the beam of charged particles propagating along the optical axis away from the optical axis,
whereby the magnitude of the deflection is chosen such that the combined action of deflecting and focussing the beam directs the beam of charged particles to hit the specimen surface from a first direction;
the deflection causing a first contribution to the aberration on the specimen surface;
 - e) redirecting the deflected beam of charged particles,
whereby the redirection is chosen such that the combined action of redirecting and focussing the deflected beam directs the beam of charged particles to hit the specimen surface under said large beam landing angle from a second direction substantially opposite to said first direction;
the redirection causing a second contribution to the aberration on the specimen surface;

whereby the deflection in step d) and the redirection in step e) are chosen such that the total aberration on the specimen surface is minimized.

The deflection and redirection can be varied while keeping the beam landing angle constant. That way, the first and second contributions to the aberration can be varied without changing the beam landing angle. In the method according to an embodiment of the invention, the deflection and redirection is then adjusted to yield minimum (total) aberration on the sample surface at constant landing angle. In the framework of the above-mentioned theory this will be the case when the deflection and redirection are such that the first and second contribution to the aberration essentially compensate each other.

According to further aspect, the invention provides a column for directing a beam of charged particles onto a specimen under a large beam landing angle, the column comprising: a

particle source for providing a beam of charged particles propagating along an optical axis; an objective lens for focussing the beam of charged particles onto the specimen; a pre-lens deflection unit for deflecting the beam of charged particles away from the optical axis, the pre-lens deflection unit being arranged between the particle source and the objective lens such that the fields of the pre-lens deflection unit and the objective lens have substantially no overlap; an in-lens deflection unit for redirecting the deflected beam of charged particles to the opposite side of the optical axis, the in-lens deflection unit being arranged in the vicinity of the objective lens such that the fields of the in-lens deflection unit and the objective lens have appreciable overlap, such that the combined action of the objective lens and the in-lens deflection unit directs the beam of charged particles back to the optical axis whereby the beam of charged particles hits the specimen under said large beam landing angle.

According to another aspect of the invention, a charged particle column having a defined optical axis is provided, the charged particle column comprising a charged particle source, an objective lens, a pre-lens deflection unit positioned between the source and the objective lens, an in-lens deflection unit proximal to the objective lens and, when activated, creating a deflection field overlapping a focussing field of the objective lens, wherein said pre-lens deflector is operable to deflect charged particles away from the optical axis, and said in-lens deflector is operable to deflect charged particles towards the optical axis.

DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

In the following, preferred embodiments of the invention are discussed which use electrons as charged particles. The invention is, however, not limited to the use of electrons but encompasses the use of protons, ions and other charged particles as well.

For a better understanding of the invention, typical problems associated with prior art designs in SEMs are illustrated in Figs. 2 and 3. Generally, an electron beam is released from an electron source 12 and propagates along the optical axis 16 towards an objective lens 20. Elements such as the anode of the electron source, condenser lenses, apertures, scan coils, detectors and the like that are not important for understanding the present invention are omitted in the drawings. Objective lens 20 focuses the electron beam onto the surface of a specimen 18. The interaction of the electron beam with the specimen 18 generates secondary electrons which are collected and detected by a suitable detector (not shown).

In Fig. 2, a two-stage pre-lens deflection unit 70 deflects the beam from its path 15a along the optical axis 16 to a path 15b which seems to emerge from a point coincident with the apparent position of the particle source 12. That way the deflected beam is focussed by the objective lens 20 on the same area of the sample for any deflection as long as the sample surface is in focus (ray 15d). Due to the deflection, the beam traverses the field of the objective lens considerably off-axis leading to large chromatic aberrations.

For an on-axis beam, the finite energy spread of the beam results in a disk of least confusion with diameter d_c , which can be written as

$$d_c = C_c \alpha \Delta E/E, \quad (1)$$

where C_c is the chromatic aberration coefficient, α is usually the convergence angle, and $\Delta E/E$ is the fractional variation in the electron-beam energy. Formula (1), which describes the chromatic aberration for an on-axis beam with convergence angle α , can also be used to describe a situation where the charged particle beam passes the lens off-axis. In this case, the convergence angle α has to be replaced by the beam landing angle in equation (1) and the length d_c is a lateral extension of the elongated beam cross section. A large chromatic aberration arises as the beam landing angle is very large (several degrees) compared to typical convergence angles (a few tenth of a degree).

The effect is schematically shown in Fig. 2 by rays 15c, 15d and 15e representing electrons with energies $E - \Delta E$, E , and $E + \Delta E$, respectively. In designs as illustrated in Fig. 2, chromatic aberration blurs the image and limits the attainable resolution to several tens of nanometers.

Figure 3 shows an alternative prior art design wherein deflection coils 82, 84 are arranged below the objective lens 20 to form a post-lens deflection system 80. After the beam passes through the objective lens 20, a first deflection coil 82 deflects the beam away from the optical axis and a second deflection coil 84 directs the beam back to the optical axis to hit the sample under the desired beam landing angle. As the beam passes the objective lens 20 on the optical axis 16, the resolution is not degraded by the off-axis aberration of the lens. However, the physical dimensions of the coils below the final lens 20 imposes a limit on the minimum working distance attainable, requiring objective lenses with larger focal lengths. The larger focal length then gives rise to increased chromatic as well as to increased spherical aberrations. Accordingly, solutions as illustrated in Fig. 3, do also not achieve acceptable image resolutions.

Figure 1a illustrates a particular embodiment of a column according to the invention, generally represented by the reference numeral 10. As before, an electron beam is released from an electron source 12 and propagates on a path 14a along the optical axis 16 towards an

objective lens 20 which focuses the beam onto the surface of a specimen 18. The pre-lens deflection unit 30 comprises two deflection coils 32, 34 to deflect the beam from the optical axis 16 to a path 14b which seemingly emerges from a point coincident with the apparent position of the electron source 12. Depending on the design of the column, reference sign 12 may represent the electron source itself or an intermediate image of the electron source.

The pre-lens deflection unit 30 is arranged between the electron source 12 (or an intermediate image thereof) and the objective lens 20 such that there is practically no overlap between the respective fields. The chromatic aberration produced by the pre-lens deflection unit 30 is then independent of the position of the pre-lens deflection unit 30 and is roughly proportional to the chosen beam landing angle. In the embodiment shown in Fig. 1a, the chromatic aberration produced by the pre-lens deflection unit 30 was 100 nm per 5° tilt angle. If only the pre-lens deflection unit 30 but not the in-lens deflection unit 40 is used, the electron beam follows a path as schematically represented by reference sign 14c, hitting the specimen surface from a first direction. In the top view of the specimen of Fig. 1b, the projection of this first direction onto the specimen surface is illustrated by arrow 14c.

When a deflection system is placed inside the field of the objective lens such that the respective fields overlap, the chromatic aberration is reduced. By placing the deflection system deep inside or slightly below the objective lens, reductions of 50% or even more have been achieved. In the embodiment shown schematically in Fig. 1a an additional deflection system, namely the in-lens deflection unit 40 was placed such that the chromatic aberration was reduced by 50%. Thus, the chromatic aberration of the in-lens deflection unit 40 was only 50 nm per 5° tilt angle.

The in-lens deflection unit 40 is a two-stage unit comprising deflection coils 42 and 44. While the schematic sketch of Fig. 1a shows an arrangement where one of the coils is positioned above and one coil is positioned below the principal plane of the objective lens 20, other arrangements are also possible as long as there is an overlap between the fields of the deflection unit 40 and the objective lens 20. It is preferred that the overlap between the respective fields is made as large as possible.

The present inventors have observed that the chromatic aberration which results from the off-axis path of the beam due to the deflection by the pre-lens deflection unit 30 can be compensated by the use of the in-lens deflection unit 40. As mentioned above, without the in-

lens deflection unit 40, the electron beam follows path 14c, hitting the specimen surface from a first direction. Now, the in-lens deflection unit 40 redirects the beam so that it takes a path schematically represented by reference sign 14d in Fig. 1a. The redirection is such that the electron beam hits the surface of the specimen from a second direction which is substantially opposite to the first direction. Fig. 1b shows a projection of the second direction onto the specimen surface, illustrated by arrow 14d. While it may appear from Fig. 1a that the path 14d crosses the optical axis 16 close to the main plane of the objective lens 20, this need not always be the case.

As the in-lens deflection unit 40 is inside the field of the objective lens 20, it is not the action of the in-lens deflection unit 40 alone, but the combined action of the in-lens deflection unit 40 and the objective lens 20 that directs the beam back to the optical axis such that it hits the sample under the preselected landing angle. Since the field of the objective lens 20 and the in-lens deflection unit 40 overlap considerably, their contributions to the beam bending cannot be separated graphically in Fig. 1a. For illustration, Fig. 1a shows the beam path in a simplified manner, as if its deflection were only due to the in-lens deflection unit 40.

The beam paths shown in Figs. 1 to 3 are further simplified in that they do not show the rotation of the beam caused by magnetic lenses. These effects are not shown, as they are difficult to depict in a two-dimensional drawing and because the skilled person is well aware of these additional effects. Also, these effects are not important for an understanding of the present invention.

Without being bound to a particular theory, it is presently thought that the compensation of the chromatic aberration can be explained as follows:

If a net beam landing angle of 5° is desired, the pre-lens deflection unit 30 is excited to a level which would lead to a landing angle of 5° coming from a first direction if the in-lens deflection unit 40 is not activated. In Fig. 1a, the beam would then follow path 14c and land on the specimen under an angle of 5° coming from the right (also shown in Fig. 1b).

Then, the in-lens deflection unit 40 is excited to a level which would lead to a landing angle of 10° coming from a second direction, substantially opposite to the first direction, if the pre-lens deflection unit 30 would not be activated. Both deflecting units 30, 40 together then give rise to path 14d and to the desired landing angle of $10^\circ - 5^\circ = 5^\circ$, coming from the second direction (also shown in Fig. 1b). With the values of the chromatic aberrations mentioned above, the chromatic aberrations introduced are:

100 nm in the first direction (100 nm/5° at an angle of 5°) and
 100 nm in the second, opposite direction (50 nm/5° at an angle of 10°).
 Since the aberrations are equal and in opposite directions, they compensate each other.

It is clear that for different values of the chromatic aberrations of the deflection units, other tilt angles have to be chosen to achieve the same beam landing angle. If, for example, the pre-lens deflection unit has an aberration of 100 nm/5° and the in-lens deflection unit has an aberration of 60 nm/5°, the tilt angles should be 7.5° and 12.5°, respectively. The beam landing angle is then $12.5^\circ - 7.5^\circ = 5^\circ$, and the chromatic aberrations are compensated ($100 \text{ nm/5}^\circ \cdot 7.5^\circ = 150 \text{ nm}$ in one direction, $60 \text{ nm/5}^\circ \cdot 12.5^\circ = 150 \text{ nm}$ in the opposite direction).

It should be emphasized that the practice of the invention does not rely on the correctness or a knowledge of the above-mentioned mechanism. Especially, the aberrations of the pre-lens and in-lens deflection units 30, 40 and the tilt angles mentioned above do not have to be known. For the invention, it is sufficient that the in-lens deflection unit 40 redirects the beam so that it lands from a direction substantially opposite to the first direction (i.e. the direction under which the beam would hit the surface of the specimen without the in-lens deflection unit) and that the field of the in-lens deflection unit 40 overlaps with the field of the objective lens 20, while the field of the pre-lens deflection unit 30 does not. The aberration of the in-lens deflection unit 40 is then reduced compared to the pre-lens deflection unit 30 and for any preselected beam landing angle there exist tilt angles which lead to a compensation of the chromatic aberrations. The specific excitations at which the desired landing angle at maximum compensation is achieved can be extracted experimentally from the images obtained.

From the above examples it is clear that the in-lens deflection unit 40 must deflect by a larger angle if its chromatic aberration is closer to the chromatic aberration of the pre-lens deflection unit 30. Therefore, it is preferred that the in-lens deflection unit 40 is positioned deep inside or even slightly below the field of the objective lens 20 such that their respective fields overlap considerably.

While the figures show the pre-lens deflection unit 30 to comprise two deflection coils 32, 34, it is also possible to use a pre-lens deflection unit 30 consisting of a single deflector only, for example, in a case where reference sign 12 represents an intermediate image of an electron

source. Advantageously, the single deflector is then placed approximately at the height of the intermediate image. This single deflector is then sufficient to deflect the beam away from the optical axis 16 to a path which seems to emerge from the intermediate image of the electron source.

Another embodiment of the invention is discussed with respect to Fig. 4. This figure shows in greater detail an objective lens 50 which allows two imaging modes:

It has been found that the strength of the deflecting field of the in-lens deflection unit 40 has to be increased if objective lenses with shorter focal lengths are used. In some applications it is beneficial to work with an objective lens with a very short focal length. This would require an in-lens deflection unit having a very large deflecting field. However, the maximum strength of the field of an in-lens deflection unit is limited, which in turn demands that the focal length of the objective lens be larger than a certain value, which is often larger than desired. This is, because the achievable resolution of such a rather weak objective lens in the standard imaging mode, i.e. in a mode when no beam tilt is needed, may be limited to about 5 nm.

The objective lens 50 of Fig. 4 overcomes this problem by providing two imaging modes: a high resolution imaging mode for cases where a beam tilt is not required, and a beam tilt mode with reduced resolution.

Objective lens 50 is a combined magnetic-electrostatic lens which leads to superior resolution at low acceleration energies. Its magnetic lens is a two-stage lens comprising a lower lens with short focal length formed by pole pieces 52 and 54 and an upper lens with larger focal length formed by pole pieces 54 and 56. Its electrostatic lens for decelerating the particle beam is formed by the electrode 58 and the lower pole piece 52 of the lower magnetic lens.

If high resolution is desired and no beam tilt is needed, only the lower lens 52, 54 is used. Due to its small focal length a resolution of about 2 nm is achieved. The in-lens deflection coils 40 can in this case be used as scan coils or as shift coils.

On the other hand, if a large beam landing angle is needed, the upper lens 54, 56 is used. Being weaker, the constraints on the deflection fields of the deflection unit 40 are easily met.

In this mode, large beam landing angles can be achieved at the cost of a slightly worse resolution (about 4 nm). Of course, both lenses may be used simultaneously to produce results lying between the above extremes in a tradeoff between high resolution and large landing angle.

Further embodiments of objective lenses implementing features of the invention are shown in Figs. 5 to 10. As can be understood, any of the described lenses can be used as objective 20 shown in Fig. 1a.

In Fig. 5, the objective lens 120 is a single stage purely magnetic lens. The magnetic lens may be combined with an electrostatic lens, preferably an electrostatic retarding lens for improved resolution at very low energies of about or below 2 keV.

The electrostatic retarding field may be created between the objective lens 220 and the specimen 18 by applying a potential to one of those, usually to the specimen 18. In the embodiment of Fig. 6 a negative potential U is applied to the specimen, while a pole piece 252 of the objective lens 220 is grounded. For a beam energy inside the focusing magnetic lens of, for example, between 2 and 20 keV, the negative potential U is, for example, between 2 and 20 kV, resulting in a landing energy between 10 eV and 2 keV. This low landing energy improves the focusing properties of the lens and the image resolution.

Further embodiments are illustrated with respect to objective lens 320 in Fig. 7, wherein the potential $U1$ applied to the specimen 18 and potential $U2$ applied to the electrode 326 are optional. In one case, electrodes 324, 326 and corresponding potentials $U2$ and $U3$ are present and form an electrostatic lens generating a retarding field decelerating the electron beam above the sample. Potential $U3$ is, for example, between 2 and 20 kV, and potential $U2$ is, for example, between 0 and 5 kV. If, in a second case, an additional potential $U1$ is applied to the specimen, it may be varied between -5 kV and 5 kV.

Electrode 326 and potential $U2$ are not required, but, if present, provide improved control of the field at the specimen surface.

Figure 8 illustrates the use of the pre- and in-lens deflection system with an electrostatic three electrode (422, 424, 426) objective lens 420. The in-lens deflection units 40 comprises two deflectors 42, 44, each arranged between two of the electrodes (422, 424 and 424, 426) of

the objective lens 420. In an alternate embodiment, the electrodes 422, 424, 426 are split into segments, and the in-lens deflection unit is formed by a subset of the lens segments.

Figure 9 shows a column with an objective lens 520 as in Fig. 7, but wherein a further strong magnetic lens 90 is placed below the specimen 18 to achieve high resolution in the operating mode without beam tilt. Of course, as discussed in connection with Fig. 4, the strong magnetic lens 90 may also be operated in a mode with beam tilt to achieve a tradeoff between high resolution and large beam landing angle.

Figure 10 shows a configuration similar to that of Fig. 4, with a two-stage compound magnetic-electrostatic objective lens 620. An electrostatic retarding lens is formed by the electrodes 624, 626 yielding improved resolution at low energies around and below 2 keV. The magnetic lens is a two-stage lens with a lower lens formed by the pole pieces 652 and 654, and an upper lens formed by the pole pieces 654, 656. In this embodiment, the lower lens has a focal length of, for example, 4 mm while the upper lens has a focal length of, for example, 15 mm. This column is operated as described in connection with Fig. 4 above.

4 Brief Description of Drawings

Some of the above indicated and other more detailed aspects of the invention will be described in the following description and partially illustrated with reference to the figures in which

- Fig. 1a is a schematic vertical cross section of a beam column according to an embodiment of the invention;
- Fig. 1b is a schematic top view on the specimen of the column of Fig. 1a;
- Fig. 2 is a schematic vertical cross section of a prior art beam column using a pre-lens deflection system;
- Fig. 3 is a schematic vertical cross section of a prior art beam column using a post-lens deflection system;
- Fig. 4 is an enlarged view of a two-stage objective lens according to an embodiment of the invention;
- Fig. 5-10 show vertical cross sections of the lower part of beam columns according to further advantageous embodiment of the invention;

In the figures, like reference numerals refer to like elements.

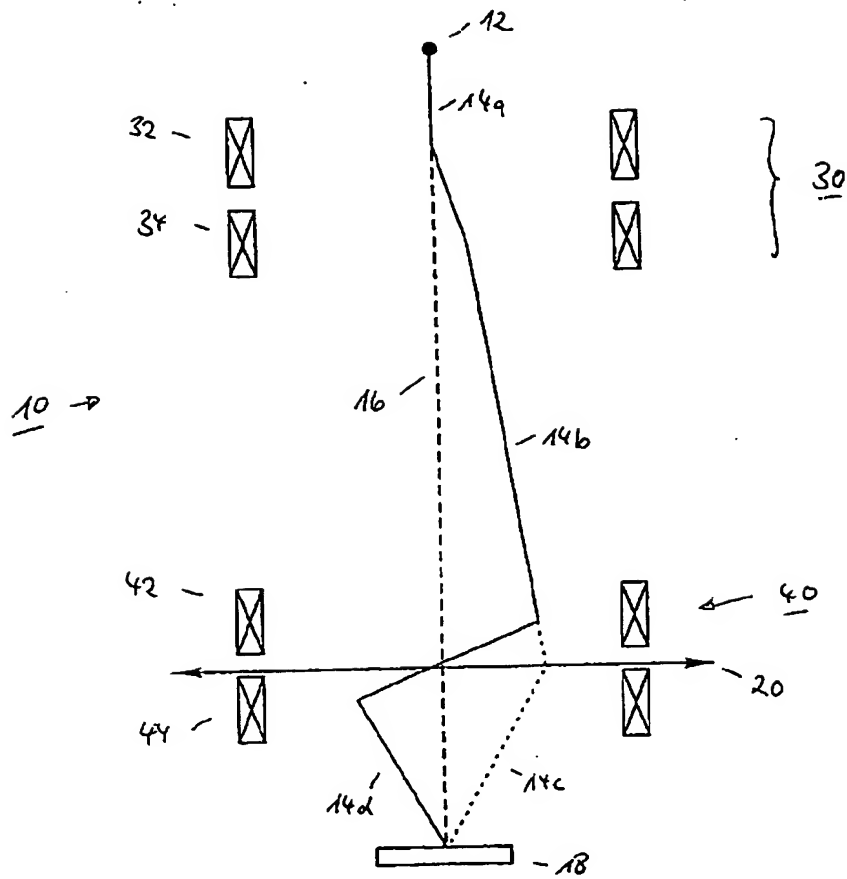


Fig. 1a

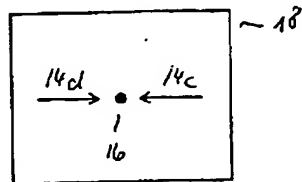


Fig. 1b

(33)

特開2000-348658

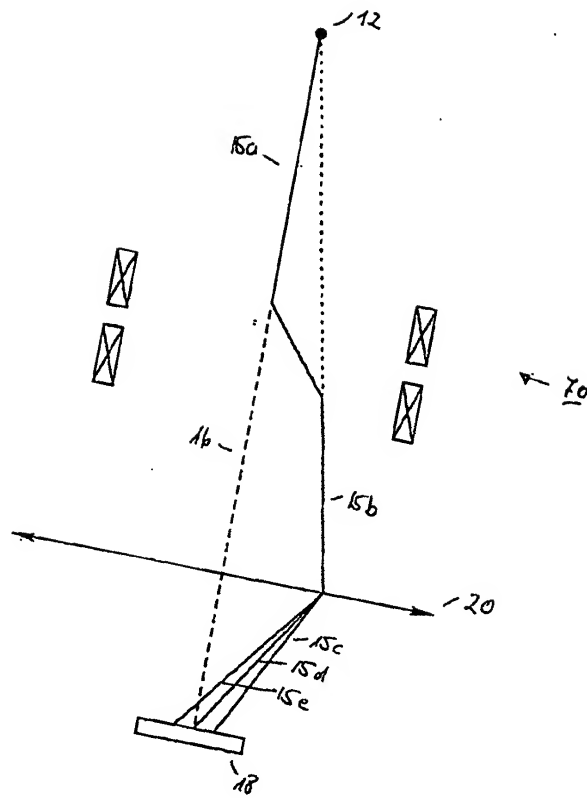


Fig. 2

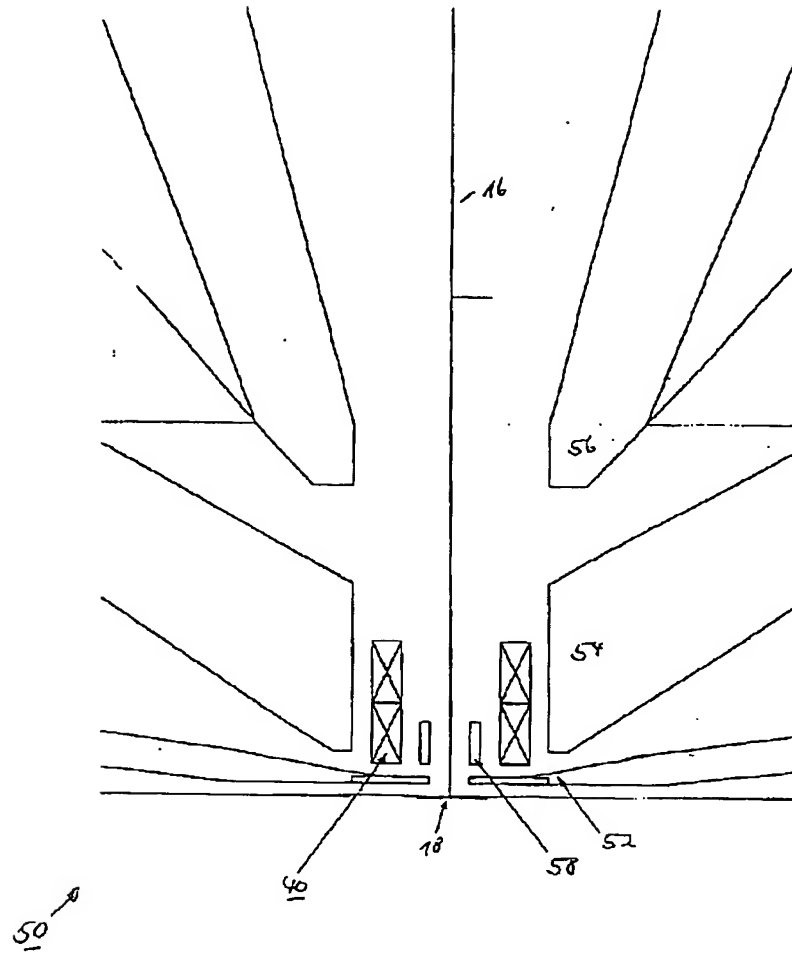


Fig. 4

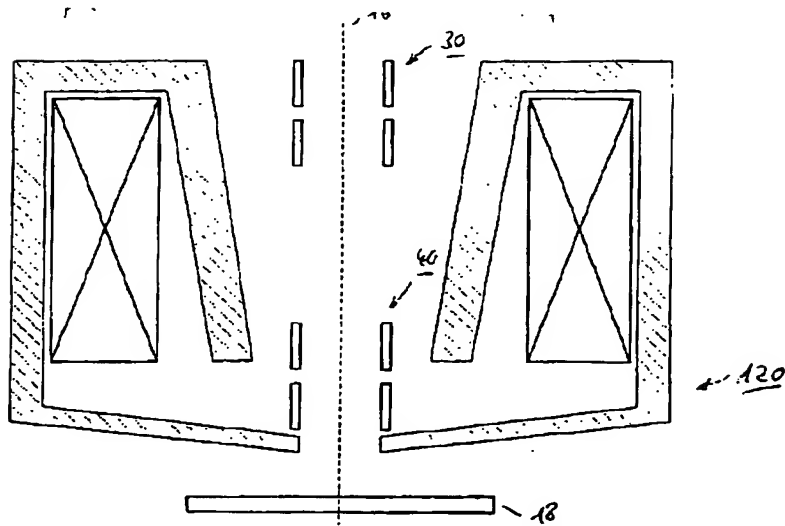


Fig. 5

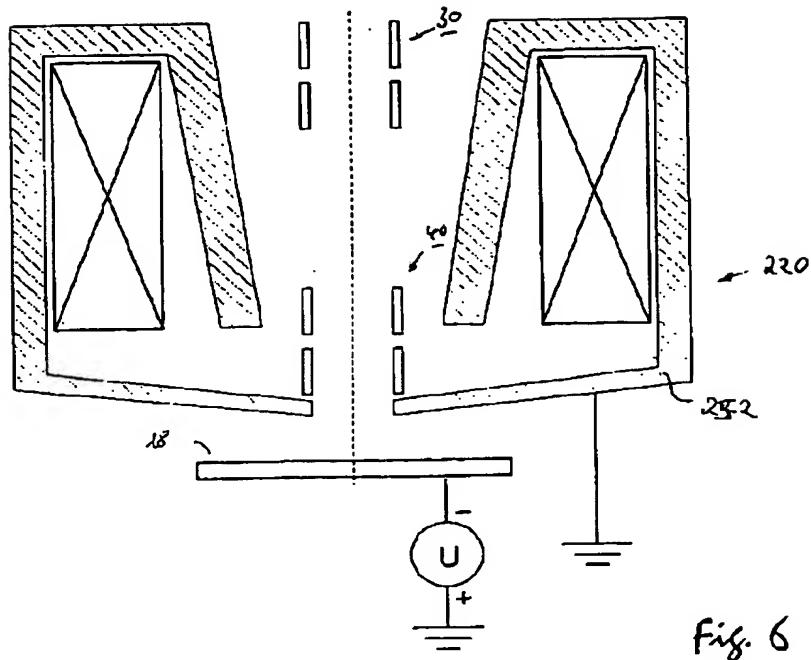


Fig. 6

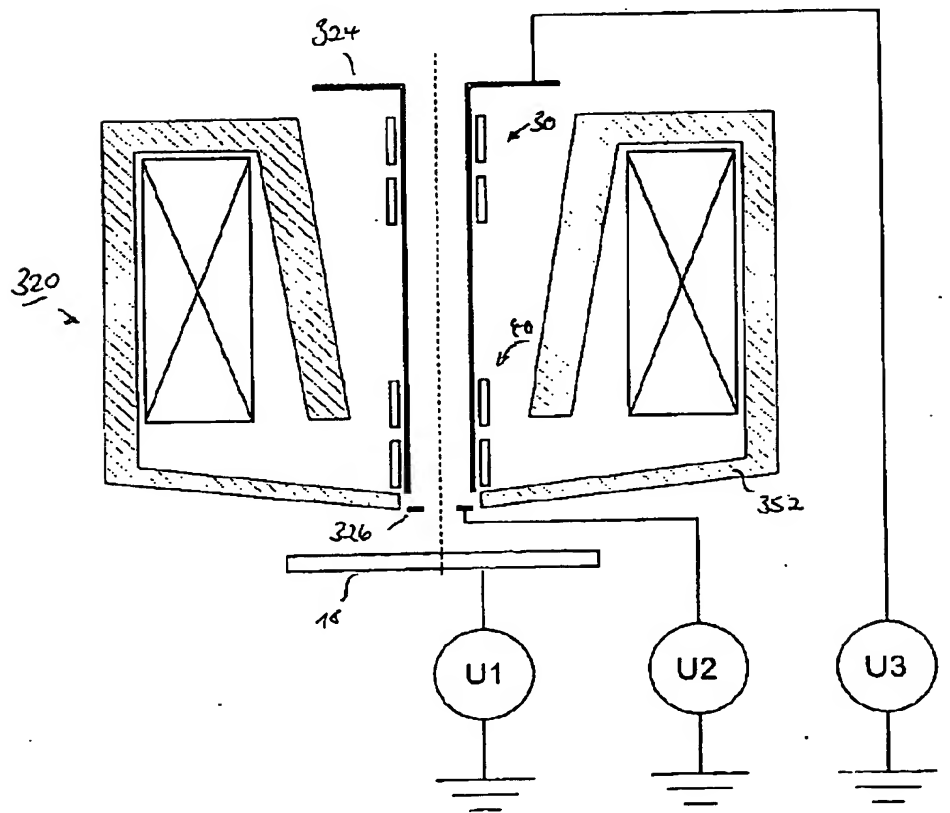


Fig. 7

